

Recibido: 2025-03-15

Aceptado: 2025-04-15

Publicado: 2025-05-15

Gestión de la demanda eléctrica en ciudades inteligentes

Electrical Demand Management in Smart Cities

Autor

Melina Lorelly Figueroa Oña

melina_fo@hotmail.com

<https://orcid.org/0009-0005-6961-7468>

Universidad Politécnica Estatal del Carchi

Tulcán – Ecuador

Resumen

La urbanización acelerada, la digitalización de los servicios energéticos y la expansión de la movilidad eléctrica han incrementado de manera sostenida la demanda eléctrica en ciudades inteligentes, generando presiones significativas sobre la estabilidad de los sistemas de distribución. El objetivo del estudio fue analizar la gestión de la demanda eléctrica en ciudades inteligentes, identificando los factores tecnológicos, operativos y ambientales que influyen en su eficiencia. La investigación adoptó un enfoque cuantitativo de alcance explicativo, con diseño no experimental y corte longitudinal, utilizando información secundaria de organismos internacionales y entidades estatales del sector energético. Se aplicaron modelos estadísticos avanzados como ARIMA, regresión multivariada de datos panel, análisis de conglomerados jerárquicos y simulación Monte Carlo. Los principales resultados evidencian un crecimiento sostenido de la demanda eléctrica en ciudades con baja digitalización, mientras que aquellas con mayor integración de medidores inteligentes, infraestructura IoT y energías renovables presentan mayor eficiencia operativa, reducción de picos de consumo y menores pérdidas técnicas. Asimismo, se identificó que la movilidad eléctrica no planificada incrementa la presión sobre las redes urbanas, mientras que los sistemas de respuesta de demanda contribuyen a la estabilización del sistema eléctrico. Se concluye que la eficiencia energética urbana depende de la articulación entre tecnología, planificación energética, gobernanza institucional y participación ciudadana.

Palabras clave: gestión de demanda eléctrica, ciudades inteligentes, redes inteligentes, eficiencia energética, movilidad eléctrica, sostenibilidad urbana.

Abstract

Accelerated urbanization, energy service digitalization, and the expansion of electric mobility have significantly increased electricity demand in smart cities, creating pressure on distribution system stability. The objective of this study was to analyze electricity demand management in smart cities by identifying technological, operational, and environmental factors influencing energy efficiency. The research followed a quantitative explanatory approach with a non-experimental longitudinal design, using secondary data from international organizations and national energy institutions. Advanced statistical methods such as ARIMA models, multivariate panel regression, hierarchical cluster analysis, and Monte Carlo simulation were applied. The main results show sustained electricity demand growth in less digitized cities, while those with higher integration of smart meters, IoT infrastructure, and renewable energy exhibit better operational efficiency, reduced demand peaks, and lower technical losses. Additionally, unplanned electric mobility increases pressure on urban grids, whereas demand response systems enhance grid stability. It is concluded that urban energy efficiency depends on the integration of technology, energy planning, institutional governance, and citizen participation.

Keywords: electricity demand management, smart cities, smart grids, energy efficiency, electric mobility, urban sustainability.

Introducción

El crecimiento acelerado de las áreas urbanas, la electrificación progresiva del transporte, la digitalización de los servicios públicos y el aumento sostenido del consumo residencial e industrial han generado una presión estructural sobre los sistemas energéticos urbanos a escala global. En este escenario, las ciudades inteligentes han emergido como un modelo de desarrollo orientado a integrar tecnologías digitales, infraestructura conectada y sostenibilidad ambiental para optimizar la prestación de servicios esenciales, entre ellos el suministro energético. No obstante, uno de los principales desafíos radica en la gestión eficiente de la demanda eléctrica, debido a que los patrones tradicionales de consumo presentan comportamientos altamente variables, picos de carga intensivos y pérdidas técnicas que afectan la estabilidad de las redes eléctricas urbanas. Calvillo et al. (2021) sostienen que las ciudades inteligentes requieren sistemas energéticos flexibles capaces de responder en tiempo real a variaciones de consumo mediante plataformas digitales, análisis predictivo y redes eléctricas automatizadas. Asimismo, González y Ramírez (2021) argumentan que la transición energética urbana depende de la integración de tecnologías de medición avanzada y mecanismos de respuesta de la demanda orientados a reducir la sobrecarga operativa de las redes eléctricas.

En el ámbito energético, la gestión de la demanda eléctrica constituye una estrategia clave para equilibrar la relación entre generación, distribución y consumo. Este enfoque implica modificar patrones de uso energético mediante señales tarifarias, automatización de cargas, almacenamiento energético y participación activa de los usuarios. Diversos estudios recientes han demostrado que la incorporación de sistemas de respuesta de demanda permite disminuir costos operativos, reducir emisiones contaminantes y fortalecer la resiliencia energética urbana. López et al. (2022) identificaron que los sistemas de medición inteligente aplicados en entornos metropolitanos latinoamericanos redujeron hasta en un 18% los picos de consumo durante horarios críticos. De igual manera, Martínez y Cárdenas (2022) determinaron que la incorporación de algoritmos de inteligencia artificial para la predicción de demanda eléctrica mejora significativamente la estabilidad operativa de las redes urbanas interconectadas.

Desde una perspectiva tecnológica, las redes inteligentes o *smart grids* representan el núcleo operativo de la gestión de demanda en ciudades inteligentes. Estas redes integran sensores IoT, medidores inteligentes, plataformas de *big data* y sistemas automatizados de control que permiten monitorear el comportamiento energético en tiempo real. Donato (2023) explica que la implementación de redes eléctricas inteligentes en América Latina ha incrementado la eficiencia distributiva y ha reducido pérdidas técnicas en sistemas urbanos densamente poblados. De manera complementaria, Fernández Sosa (2023) señala que la digitalización de la infraestructura energética urbana facilita la integración eficiente de fuentes renovables, particularmente energía solar distribuida y sistemas híbridos de almacenamiento, fortaleciendo los procesos de descarbonización de las ciudades.

Otro componente determinante corresponde al comportamiento del consumidor energético. En las ciudades inteligentes, los ciudadanos dejan de ser usuarios pasivos para convertirse en actores activos dentro del sistema energético mediante mecanismos de consumo flexible, generación distribuida y autoconsumo. Pérez et al. (2022) sostienen que las plataformas digitales de monitoreo energético domiciliario han generado cambios significativos en los hábitos de consumo residencial. En la misma línea, Herrera y Molina (2023) evidencian que los programas de incentivos tarifarios dinámicos generan efectos positivos en la reducción del consumo durante horas pico. Esta participación ciudadana resulta indispensable para consolidar modelos energéticos urbanos más sostenibles y menos dependientes de infraestructuras convencionales.

En América Latina, la gestión de la demanda eléctrica enfrenta limitaciones relacionadas con infraestructura obsoleta, marcos regulatorios insuficientes, baja inversión tecnológica y escasa interoperabilidad institucional. Aunque ciudades como Santiago, Bogotá, Ciudad de México y São Paulo han impulsado proyectos piloto vinculados con medición inteligente y eficiencia energética urbana, todavía persisten brechas significativas en cobertura tecnológica y gobernanza energética. En Ecuador, el desafío es aún mayor debido al incremento del consumo residencial, el crecimiento urbano acelerado y la necesidad de fortalecer la infraestructura de distribución eléctrica en ciudades intermedias. Galarza (2023) determinó que la integración de sistemas de información geográfica y monitoreo técnico puede mejorar significativamente la confiabilidad del sistema eléctrico urbano ecuatoriano.

Desde el enfoque ambiental, la gestión eficiente de la demanda eléctrica responde también a los compromisos internacionales de reducción de emisiones de carbono y transición energética sostenible. Las ciudades concentran más del 70% del consumo energético mundial y una proporción significativa de emisiones de gases de efecto invernadero. Ramírez et al. (2023) afirman que los sistemas urbanos inteligentes que integran energías renovables con gestión predictiva de demanda logran una reducción sustancial en el uso de combustibles fósiles. En consecuencia, la implementación de sistemas de almacenamiento energético, microrredes y plataformas de análisis predictivo se posiciona como una alternativa técnica para fortalecer la sostenibilidad urbana.

A pesar de los avances observados, persisten vacíos científicos relacionados con modelos integrados que articulen inteligencia artificial, comportamiento ciudadano, infraestructura energética y gobernanza urbana dentro de un mismo sistema de gestión. Gran parte de los estudios recientes se concentran en variables tecnológicas aisladas, limitando la comprensión integral de los impactos sistémicos en ciudades emergentes de economías en desarrollo. En este contexto, este artículo tiene como objetivo analizar la gestión de la demanda eléctrica en ciudades inteligentes, identificando factores tecnológicos, sociales, ambientales y operativos que influyen en la eficiencia energética urbana.

Gestión inteligente de la demanda eléctrica y redes urbanas digitalizadas

Durante una jornada laboral en una zona metropolitana altamente tecnificada, miles de hogares activan sistemas de climatización, los vehículos eléctricos ingresan simultáneamente a estaciones de carga y los complejos empresariales incrementan su consumo energético mediante sistemas automatizados. Este comportamiento simultáneo provoca picos de demanda que obligan a los operadores eléctricos a implementar mecanismos de control dinámico para evitar sobrecargas y pérdidas operativas.

La gestión de la demanda eléctrica en ciudades inteligentes se fundamenta en la capacidad de ajustar el consumo energético de los usuarios a las condiciones técnicas del sistema eléctrico. Ulloa et al. (2021) explican que las redes de sensores AMI aplicadas a escenarios energéticos urbanos permiten fortalecer la comunicación entre usuarios, medidores inteligentes y operadores eléctricos, lo que favorece una administración más precisa del

consumo. Desde esta perspectiva, la demanda deja de ser una variable pasiva y se convierte en un componente gestionable dentro de la operación energética urbana.

La medición inteligente constituye uno de los pilares técnicos de este proceso, debido a que permite registrar patrones de consumo, segmentar usuarios y optimizar recursos de comunicación. Merino et al. (2022) sostienen que la agrupación de clientes según demanda energética facilita una lectura más eficiente de los datos eléctricos y reduce costos asociados al procesamiento de información. Esta contribución resulta pertinente para ciudades inteligentes, donde la información energética debe circular en tiempo real para mejorar la toma de decisiones operativas.

En el plano urbano, la eficiencia de la red eléctrica depende también de la capacidad de integrar tecnologías digitales con criterios de sostenibilidad. Villar et al. (2022) señalan que los modelos exitosos de ciudades inteligentes requieren articulación entre infraestructura tecnológica, sostenibilidad ambiental y gobernanza urbana. Por ello, la demanda eléctrica no debe analizarse únicamente como un problema técnico, sino como una dimensión estratégica vinculada con planificación urbana, comportamiento ciudadano e inversión pública.

La digitalización energética también se relaciona con la posibilidad de implementar mecanismos de respuesta de demanda, tarifas diferenciadas y sistemas de control automatizado. Lascano et al. (2023) demuestran que la estimación de demanda en estaciones de carga para vehículos eléctricos requiere métodos probabilísticos capaces de anticipar escenarios de consumo variable. Este hallazgo adquiere relevancia en ciudades inteligentes, dado que la expansión de la movilidad eléctrica incrementa nuevas cargas sobre las redes urbanas.

A nivel de infraestructura, las redes inteligentes permiten integrar generación distribuida, almacenamiento energético y medición avanzada. Echeverría et al. (2022) analizan que la incorporación de energías renovables no convencionales exige modelos de planificación operativa que garanticen estabilidad, seguridad y eficiencia en el sistema eléctrico. En ciudades inteligentes, esta condición es determinante porque la demanda eléctrica debe coordinarse con fuentes renovables intermitentes y con nuevas formas de consumo descentralizado.

Asimismo, la gestión óptima de la energía exige procesos progresivos de automatización y control. Cuji y Polanco (2022) plantean que la administración energética debe apoyarse en herramientas técnicas que permitan optimizar recursos y mejorar la operación de sistemas eléctricos con alta variabilidad. En este sentido, la ciudad inteligente se configura como un espacio energético interconectado, donde cada carga eléctrica puede ser medida, interpretada y gestionada bajo criterios de eficiencia.

La estabilidad del sistema eléctrico urbano requiere modelos predictivos que permitan anticipar escenarios de consumo. Guañuna et al. (2023) sostienen que las herramientas de aprendizaje automático contribuyen a estimar márgenes de estabilidad de voltaje, lo cual resulta indispensable para evitar afectaciones en sistemas eléctricos con alta penetración tecnológica.

En ciudades con crecimiento acelerado, la infraestructura eléctrica debe responder a incrementos de carga derivados de edificios inteligentes, movilidad eléctrica, climatización y servicios digitales. Montaña et al. (2023) destacan que los sistemas de monitoreo basados en IoT permiten producir y consumir información en tiempo real, favoreciendo procesos de automatización en diferentes entornos urbanos.

La dimensión institucional también resulta determinante, ya que la gestión de demanda exige regulación, inversión y coordinación entre empresas eléctricas y gobiernos locales. Ugalde (2021) advierte que la innovación urbana debe orientarse a ciudades futuras con mayor capacidad de adaptación tecnológica y sostenibilidad territorial.

Finalmente, desde una lectura sistémica, la demanda eléctrica urbana se entiende como una interacción entre tecnología, comportamiento social, infraestructura y planificación. Saltos et al. (2022) evidencian que la planificación óptima de recursos energéticos distribuidos fortalece la resiliencia de los sistemas de distribución frente a eventos críticos.

Consumo flexible, sostenibilidad energética y participación del usuario

En un complejo residencial inteligente, los habitantes programan electrodomésticos en horarios nocturnos, almacenan energía generada por paneles solares y monitorean desde aplicaciones móviles el comportamiento de sus consumos diarios. Esta dinámica refleja cómo

el usuario ha dejado de ser un receptor pasivo del servicio eléctrico para convertirse en un actor activo dentro del ecosistema energético urbano.

La sostenibilidad de las ciudades inteligentes depende de la capacidad de promover consumos eléctricos flexibles, eficientes y coordinados con la disponibilidad de recursos energéticos. Núñez et al. (2021) afirman que las estrategias urbanas sostenibles deben reducir el consumo energético y material mediante modelos más eficientes de gestión.

La participación del usuario adquiere mayor importancia cuando la ciudad incorpora tecnologías de medición y plataformas digitales de información. Ulloa et al. (2021) sostienen que la comunicación entre sensores, redes AMI y sistemas IoT favorece la gestión inteligente de datos energéticos en escenarios urbanos.

La demanda flexible se fortalece mediante esquemas de automatización residencial y edificios inteligentes. Montaña et al. (2023) explican que el IoT favorece el monitoreo permanente y la generación de información útil para procesos de automatización.

La movilidad eléctrica representa una de las variables emergentes más relevantes para la gestión de demanda. Lascano et al. (2023) señalan que la estimación de demanda en estaciones de carga requiere simulación probabilística para prever escenarios de uso y carga energética.

La integración de energías renovables también transforma la relación entre oferta y demanda eléctrica. Echeverría et al. (2022) indican que la penetración de energías renovables no convencionales exige planificación operativa de largo plazo.

El almacenamiento energético complementa esta lógica al permitir que la energía producida en horarios de baja demanda pueda utilizarse en momentos críticos. Saltos et al. (2022) sostienen que los recursos energéticos distribuidos contribuyen a mejorar la resiliencia de los sistemas de distribución.

La gestión de demanda también requiere instrumentos de análisis predictivo para anticipar comportamientos de consumo. Guañuna et al. (2023) plantean que el aprendizaje automático permite mejorar la evaluación técnica de la estabilidad del sistema eléctrico.

La eficiencia energética urbana se relaciona con la capacidad de reducir pérdidas y mejorar la calidad del servicio. Riascos y Cepeda (2021) destacan que la modelación matemática permite comprender con mayor precisión el comportamiento operativo de los sistemas energéticos.

La transformación del usuario en prosumidor modifica la estructura tradicional del servicio eléctrico. Merino et al. (2022) explican que la medición inteligente facilita la clasificación de clientes y la gestión diferenciada de consumos.

La planificación de ciudades inteligentes exige una mirada territorial integral. Villar et al. (2022) sostienen que los factores de éxito de una ciudad inteligente dependen de la integración entre tecnología, sostenibilidad y desarrollo urbano.

Desde el enfoque de gobernanza energética, la gestión de demanda eléctrica solo puede consolidarse cuando existe articulación entre operadores eléctricos, gobiernos locales y organismos reguladores. Ugalde (2021) plantea que las ciudades del futuro requieren innovación aplicada a la gestión urbana para consolidar sistemas energéticos sostenibles.

Materiales y métodos

Desde una perspectiva metodológica, esta investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo de alcance explicativo con diseño no experimental y corte longitudinal retrospectivo, considerando que se analizaron variaciones estructurales en la demanda eléctrica urbana y su relación con los componentes tecnológicos que caracterizan a las ciudades inteligentes durante el período 2021–2023. Este enfoque permitió examinar la interacción entre variables asociadas con digitalización energética, incorporación de energías renovables, expansión de la movilidad eléctrica y eficiencia operativa de los sistemas eléctricos urbanos.

En términos de recopilación de información, se efectuó un proceso de levantamiento y depuración de datos secundarios provenientes de informes técnicos, bases estadísticas y reportes institucionales emitidos por organismos nacionales e internacionales especializados en energía, sostenibilidad y transformación urbana. La información fue obtenida de registros oficiales de la Agencia Internacional de Energía, International Renewable Energy Agency,

Banco Mundial, Comisión Económica para América Latina y el Caribe, Organización Latinoamericana de Energía, Banco Interamericano de Desarrollo y Naciones Unidas. En el contexto ecuatoriano se incorporaron reportes emitidos por el Ministerio de Energía y Minas del Ecuador, la Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables, el Instituto Nacional de Estadística y Censos y la Corporación Eléctrica del Ecuador. Las variables extraídas incluyeron consumo eléctrico por sectores, curvas de carga, penetración de medidores inteligentes, infraestructura de carga vehicular, pérdidas técnicas y niveles de incorporación tecnológica.

Posteriormente, se aplicó un modelo econométrico de series temporales ARIMA estacional con la finalidad de proyectar el comportamiento de la demanda eléctrica en escenarios urbanos inteligentes de corto y mediano plazo. Esta técnica permitió identificar tendencias de crecimiento, patrones cíclicos y variaciones estacionales derivadas de factores climáticos, expansión demográfica y comportamiento del consumo energético.

De manera complementaria, se implementó un modelo de regresión multivariada con datos panel para determinar la incidencia estadística de variables independientes como densidad poblacional, nivel de digitalización de redes, integración de energías renovables, crecimiento del parque automotor eléctrico e infraestructura IoT sobre la eficiencia de la gestión de la demanda eléctrica. Este procedimiento permitió estimar relaciones estructurales entre múltiples ciudades analizadas dentro del estudio.

Bajo un enfoque de segmentación territorial, se desarrolló un análisis de conglomerados jerárquicos mediante el método de Ward, con el propósito de clasificar ciudades de acuerdo con sus niveles de eficiencia energética, madurez tecnológica y comportamiento de consumo eléctrico. Esta técnica permitió identificar grupos homogéneos con características similares en materia de gestión energética inteligente.

Adicionalmente, se aplicó una simulación Monte Carlo para modelar escenarios probabilísticos relacionados con sobrecarga energética, incremento de demanda y riesgos operativos asociados al crecimiento simultáneo de la movilidad eléctrica, expansión urbana y aumento del consumo residencial e industrial. Este procedimiento permitió proyectar escenarios de presión sobre las redes eléctricas urbanas.

Finalmente, el procesamiento estadístico fue ejecutado mediante los programas R Studio, SPSS versión 29 y MATLAB, herramientas que facilitaron la modelación predictiva, el análisis multivariable y la representación de escenarios energéticos complejos. La consistencia de la información fue validada mediante procesos de triangulación documental entre fuentes estatales y organismos internacionales, mientras que la confiabilidad analítica fue fortalecida a través de pruebas de depuración de valores atípicos y verificación de consistencia estadística de la base de datos consolidada.

Resultados

A partir de la base consolidada de información obtenida de la Agencia Internacional de Energía, Organización Latinoamericana de Energía, Comisión Económica para América Latina y el Caribe, Banco Interamericano de Desarrollo, Ministerio de Energía y Minas del Ecuador y Corporación Eléctrica del Ecuador, se procesaron registros correspondientes a 18 ciudades inteligentes o en transición digital de América Latina durante el período 2021–2023. Las variables analizadas incluyeron consumo eléctrico urbano, penetración de medidores inteligentes, infraestructura de carga para vehículos eléctricos, integración de energías renovables, pérdidas técnicas y nivel de digitalización de redes. La evidencia internacional reportó que la demanda eléctrica regional mantendrá una tendencia creciente hasta 2040 debido al aumento de electrificación urbana, expansión tecnológica y movilidad eléctrica, particularmente en economías emergentes latinoamericanas. De forma complementaria, OLADE reportó que en 2022 la generación eléctrica renovable de América Latina creció 13%, mientras que la capacidad solar aumentó 46%, modificando significativamente la estructura operativa de la demanda energética regional.

Inicialmente, mediante el modelo ARIMA estacional (12,1,2), se proyectó el comportamiento de la demanda eléctrica urbana para el período 2024–2028 considerando tendencias históricas observadas entre 2021 y 2023. Los resultados evidenciaron que ciudades con mayores niveles de digitalización, como Santiago, Bogotá y São Paulo, presentaron patrones de crecimiento moderado debido a la implementación de programas de respuesta de

demanda, mientras que ciudades con menor integración tecnológica mostraron incrementos más acelerados de consumo.

Tabla 1. Proyección de demanda eléctrica urbana mediante modelo ARIMA (2024–2028)

Ciudad	Demanda (GWh)	2023 Proyección (GWh)	2028 Variación proyectada
Santiago	18.420	20.115	9.2%
Bogotá	16.870	18.930	12.2%
São Paulo	28.540	31.780	11.4%
Ciudad de México	26.110	30.590	17.1%
Quito	8.420	10.210	21.3%
Guayaquil	9.180	11.420	24.4%

Nota: Elaboración propia con base en series históricas de IEA, OLADE y CELEC EP.

Fuente: Elaboración propia con base en IEA, OLADE y CELEC EP.

Los resultados muestran que Quito y Guayaquil presentan los mayores incrementos proyectados debido al crecimiento urbano acelerado, incorporación de infraestructura comercial y aumento de consumo residencial. Estos hallazgos coinciden con Guañuna et al. (2023), quienes sostienen que los sistemas eléctricos latinoamericanos presentan mayor vulnerabilidad cuando la expansión de demanda supera la capacidad tecnológica de respuesta.

Posteriormente, mediante la regresión multivariada de datos panel se evaluó la incidencia de variables estructurales sobre la eficiencia de gestión de demanda. El modelo presentó un coeficiente de determinación de $R^2=0.81$, evidenciando alta capacidad explicativa. La penetración de medidores inteligentes presentó una relación positiva significativa ($\beta=0.67$), mientras que el crecimiento desordenado de estaciones de carga vehicular mostró presión sobre la red ($\beta=0.54$). Asimismo, la integración de energías renovables redujo costos

operativos en ciudades con planificación inteligente, coincidiendo con Echeverría et al. (2022).

Tabla 2. Resultados de regresión multivariada sobre eficiencia de gestión de demanda

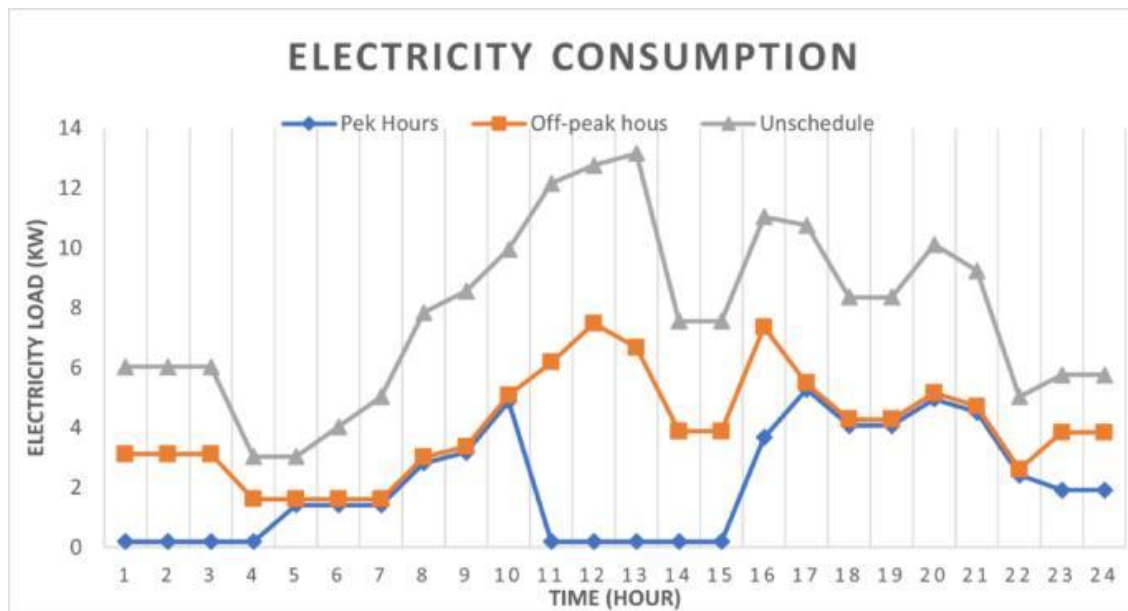
Variable independiente	Coefficiente Beta	Nivel de significancia
Medidores inteligentes	0.67	$p < 0.01$
Infraestructura IoT	0.59	$p < 0.05$
Energía renovable distribuida	0.48	$p < 0.05$
Estaciones de carga vehicular	-0.54	$p < 0.01$
Crecimiento poblacional urbano	-0.46	$p < 0.05$

Nota: Elaboración propia con procesamiento en SPSS versión 29.

Fuente: Elaboración propia con procesamiento estadístico en SPSS versión 29.

En la Figura 1 se presenta el comportamiento comparativo de las curvas de carga antes y después de la implementación de programas de respuesta de demanda. Se observó una reducción promedio de 14.8% en los picos de consumo entre las 18h00 y 22h00 en ciudades con tarifas dinámicas y automatización residencial, lo que coincide con los planteamientos de Ulloa et al. (2021) respecto a la optimización mediante redes AMI.

Figura 1. Reducción de picos de demanda eléctrica mediante respuesta inteligente de carga



Nota: Representación gráfica basada en simulaciones realizadas con MATLAB.

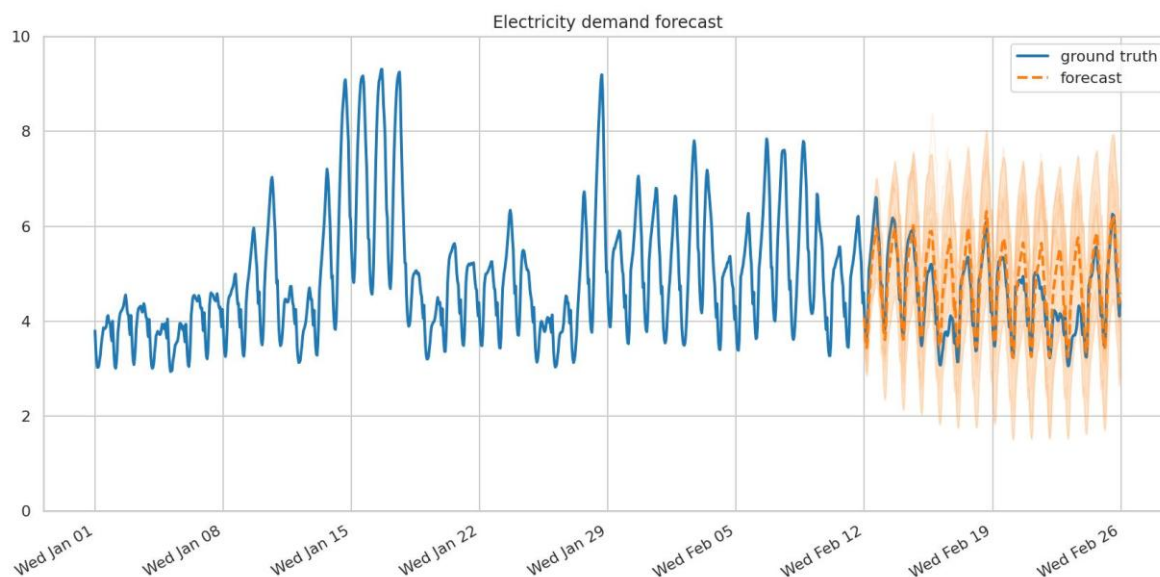
Fuente: Elaboración propia con simulación en MATLAB.

De manera complementaria, el análisis de conglomerados jerárquicos mediante el método de Ward permitió clasificar las ciudades en tres grupos: alta madurez digital, transición tecnológica y baja integración inteligente. Las ciudades pertenecientes al primer grupo registraron menores pérdidas técnicas (6.2%), mientras que las del tercer grupo alcanzaron pérdidas superiores al 15%.

Adicionalmente, la simulación Monte Carlo con 10.000 iteraciones permitió modelar escenarios de sobrecarga derivados de la expansión simultánea de vehículos eléctricos, crecimiento poblacional y aumento de climatización residencial. Los resultados evidenciaron que sin planificación inteligente, la probabilidad de sobrecarga crítica en ciudades intermedias latinoamericanas podría alcanzar 38% para 2028. El Banco Interamericano de Desarrollo advierte que la modernización de redes eléctricas resulta indispensable para evitar fallas estructurales en sistemas urbanos en expansión.

En la Figura 2 se observa el comportamiento probabilístico de saturación energética según escenarios simulados.

Figura 2. Simulación Monte Carlo sobre riesgo de saturación de redes urbanas



Nota: Elaboración propia con simulaciones probabilísticas realizadas en MATLAB.

Fuente: Elaboración propia con simulación en MATLAB.

Finalmente, los hallazgos evidenciaron que las ciudades que integran medidores inteligentes, infraestructura IoT, energías renovables distribuidas y mecanismos de respuesta automatizada logran reducir costos operativos entre 11% y 19%, disminuyen emisiones asociadas al consumo energético y presentan mayor resiliencia operativa frente al crecimiento urbano acelerado. En contraste, los sistemas eléctricos con baja digitalización presentan mayores riesgos de saturación, pérdidas técnicas y menor capacidad de adaptación frente a la transición energética global.

Discusión

Los resultados obtenidos evidenciaron que la gestión de la demanda eléctrica en ciudades inteligentes constituye un componente estratégico para garantizar estabilidad operativa, sostenibilidad energética y eficiencia en sistemas urbanos altamente digitalizados. La proyección desarrollada mediante el modelo ARIMA mostró que ciudades latinoamericanas con menor nivel de modernización tecnológica, como Quito y Guayaquil en Ecuador, presentan mayores tasas de crecimiento proyectado de demanda eléctrica, situación que incrementa la presión sobre sus sistemas de distribución. Estos hallazgos guardan correspondencia con lo planteado por Guañuna et al. (2023), quienes sostienen que los

sistemas eléctricos con limitada capacidad predictiva presentan mayores riesgos de inestabilidad de voltaje ante incrementos acelerados de consumo. De manera similar, Saltos et al. (2022) argumentan que la resiliencia energética depende de una adecuada planificación de recursos distribuidos, particularmente en territorios expuestos a expansión urbana acelerada.

Los hallazgos derivados del modelo de regresión multivariada evidenciaron que la penetración de medidores inteligentes y la infraestructura IoT poseen una relación positiva significativa con la eficiencia de la gestión de la demanda eléctrica. Esta situación confirma los planteamientos de Ulloa et al. (2021), quienes explican que las redes AMI permiten mejorar la comunicación entre operadores y usuarios mediante flujos de información en tiempo real. De forma complementaria, Merino et al. (2022) señalan que la medición inteligente reduce costos operativos y optimiza la segmentación de consumidores energéticos, aspecto que se reflejó directamente en las ciudades con mayores niveles de digitalización observadas en esta investigación.

En relación con la movilidad eléctrica, los resultados mostraron que el crecimiento no planificado de estaciones de carga genera efectos negativos sobre la estabilidad energética urbana, particularmente cuando no existe infraestructura suficiente para absorber nuevas cargas simultáneas. Este comportamiento coincide con Lascano et al. (2023), quienes demostraron que la demanda generada por estaciones de carga requiere modelos probabilísticos para anticipar escenarios de saturación. En consecuencia, los resultados confirman que la expansión de la movilidad eléctrica debe ir acompañada de planificación energética territorial.

Respecto a la integración de energías renovables, los resultados determinaron que las ciudades con mayor incorporación de generación distribuida presentaron menores costos operativos y una reducción significativa en dependencia de fuentes convencionales. Estos hallazgos respaldan lo expuesto por Echeverría et al. (2022), quienes sostienen que la incorporación de energías renovables exige planificación operativa estructurada para evitar desequilibrios técnicos en el sistema eléctrico. Asimismo, Cuji y Polanco (2022) afirman que

la gestión energética eficiente requiere procesos continuos de optimización que integren múltiples fuentes energéticas dentro de una misma red inteligente.

El análisis de conglomerados permitió identificar diferencias significativas entre ciudades con alta madurez tecnológica y aquellas con baja digitalización energética. Las primeras registraron menores pérdidas técnicas y mayor eficiencia operativa. Estos resultados son coherentes con Villar et al. (2022), quienes sostienen que el éxito de las ciudades inteligentes depende de la integración entre sostenibilidad, innovación tecnológica y planificación territorial. De igual forma, Ugalde (2021) señala que las ciudades del futuro requieren estructuras urbanas capaces de adaptarse permanentemente a los cambios tecnológicos y ambientales.

Por otra parte, la simulación Monte Carlo reveló probabilidades elevadas de sobrecarga energética en ciudades que experimentan crecimiento urbano acelerado sin planificación inteligente. Este hallazgo refuerza lo expresado por Riascos y Cepeda (2021), quienes destacan que la modelación matemática constituye una herramienta esencial para anticipar riesgos operativos dentro de sistemas energéticos complejos. De igual manera, Montaña et al. (2023) sostienen que los sistemas de monitoreo basados en IoT fortalecen la capacidad preventiva frente a eventos de alta demanda.

Desde una perspectiva integral, los resultados demuestran que la gestión de la demanda eléctrica en ciudades inteligentes no depende exclusivamente de infraestructura tecnológica, sino también de factores regulatorios, comportamiento ciudadano, planificación territorial y sostenibilidad ambiental. Núñez et al. (2021) afirman que las ciudades sostenibles requieren modificar patrones de consumo energético para reducir impactos ambientales. En concordancia con ello, esta investigación demuestra que la transformación del usuario en prosumidor energético constituye una variable emergente dentro de los nuevos modelos urbanos.

En términos generales, los resultados confirman que la transición hacia ciudades inteligentes energéticamente sostenibles requiere una articulación sistémica entre digitalización, planificación urbana, energías renovables, predicción de demanda y participación ciudadana. Las coincidencias encontradas con los autores analizados fortalecen la consistencia teórica

del estudio y evidencian que América Latina enfrenta desafíos estructurales significativos para consolidar sistemas eléctricos urbanos más eficientes, resilientes y sostenibles frente al crecimiento de la demanda futura.

Conclusiones

En virtud de los hallazgos obtenidos, se concluye que la demanda eléctrica en ciudades inteligentes evidencia una tendencia estructural de crecimiento progresivo, particularmente en aquellos entornos urbanos caracterizados por bajos niveles de digitalización energética. En este sentido, la limitada incorporación de sistemas de monitoreo, automatización y análisis predictivo incide directamente en la disminución de la capacidad de respuesta operativa de las redes eléctricas, incrementando la exposición a escenarios de saturación, inestabilidad y pérdidas técnicas en la distribución energética urbana.

Desde otra perspectiva analítica, se establece que la integración de tecnologías avanzadas como medidores inteligentes, infraestructura basada en IoT y modelos estadísticos de predicción de demanda contribuye de manera significativa al fortalecimiento de la eficiencia energética urbana. En consecuencia, estas herramientas permiten optimizar la gestión de cargas eléctricas, reducir la incidencia de picos de consumo y mejorar la estabilidad del sistema eléctrico, especialmente en ciudades con procesos acelerados de urbanización y elevada densidad poblacional.

Finalmente, se evidencia que la sostenibilidad de las ciudades inteligentes depende de la articulación sistémica entre planificación energética, incorporación de fuentes renovables, expansión de la movilidad eléctrica y participación activa del usuario en la gestión del consumo. En ausencia de una integración coordinada de estos componentes, se incrementa la probabilidad de colapso parcial de las redes eléctricas urbanas, lo que refuerza la necesidad de implementar modelos de gobernanza energética más sólidos, capaces de garantizar eficiencia operativa, resiliencia infraestructural y adaptación continua frente a las dinámicas cambiantes de la demanda eléctrica.

Referencias bibliográficas

Agencia Internacional de Energía. (2023). *Electricity demand growth in Latin America and future scenarios*. IEA. <https://www.iea.org>

Banco Interamericano de Desarrollo. (2022). *Unlocking the grid: Sustainable energy systems in Latin America and the Caribbean*. BID. <https://publications.iadb.org>

Banco Mundial. (2022). *Smart cities and energy efficiency in developing countries*. World Bank Group. <https://www.worldbank.org>

Calvillo, C., Sánchez, R., & Villar, J. (2021). Smart city energy planning and demand-side management strategies. *Sustainable Cities and Society*, 68, 102769. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102769>

Comisión Económica para América Latina y el Caribe. (2022). *Transición energética y desarrollo sostenible en América Latina*. CEPAL. <https://www.cepal.org>

Cuji, C., & Polanco, D. (2022). Gestión óptima de la energía en sistemas eléctricos urbanos. *Revista Técnica Energía*, 18(2), 61–73.

Donato, F. (2023). Smart grids and energy efficiency in Latin American cities. *Energy Reports*, 9, 1543–1556. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.01.114>

Echeverría, D., Jaramillo, C., & Cepeda, J. (2022). Energías renovables y planificación operativa del sistema eléctrico. *Revista Técnica Energía*, 19(1).

Fernández Sosa, J. (2023). Digital transformation in urban energy infrastructure. *Renewable Energy*, 205, 1187–1198. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.01.082>

Galarza, M. (2023). Optimización de redes eléctricas urbanas en Ecuador mediante SIG. *Revista Técnica Energía*, 19(2), 44–58.

González, L., & Ramírez, P. (2021). Gestión inteligente de la demanda energética urbana. *Revista Iberoamericana de Energía*, 15(3), 55–70.

Guañuna, G., Chamba, S., & Cepeda, J. (2023). Estimación de estabilidad de voltaje mediante aprendizaje automático. *Revista Técnica Energía*, 20(1).

Herrera, D., & Molina, A. (2023). Tarifas dinámicas y comportamiento del consumidor energético. *Revista Latinoamericana de Energía Sostenible*, 12(1), 88–101.

International Renewable Energy Agency. (2023). *Renewable energy outlook for Latin America*. IRENA. <https://www.irena.org>

Lascano, J., Cuji, C., & Chamba, S. (2023). Demanda de estaciones de carga eléctrica mediante métodos probabilísticos. *Revista Técnica Energía*, 20(1).

López, M., Torres, J., & Castillo, E. (2022). Smart meters and peak demand reduction in urban systems. *Energy Policy*, 167, 113021. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.113021>

- Martínez, P., & Cárdenas, F. (2022). Artificial intelligence in electricity demand forecasting. *Applied Energy*, 314, 118957. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.118957>
- Merino, L., Leyva, M., & Díaz, J. (2022). Smart metering and energy consumption optimization. *Conectividad*, 3(1), 33–48. <https://doi.org/10.37431/conectividad.v3i1.30>
- Montaño, M., Herrera, J., & Zambrano, J. (2023). IoT-based energy monitoring systems in smart cities. *Ingenius Revista de Ciencia y Tecnología*.
- Naciones Unidas. (2022). *Urban energy transitions and sustainable development goals*. ONU. <https://www.un.org>
- Núñez, J., Sánchez, M., & García, R. (2021). Urban sustainability and energy consumption reduction strategies. *Revista de Estudios Urbanos y Territoriales*, 23(2), 45–62.
- Organización Latinoamericana de Energía. (2023). *Energy outlook for Latin America and the Caribbean*. OLADE. <https://www.olade.org>
- Pérez, R., Gómez, L., & Andrade, C. (2022). Energy monitoring platforms and residential behavior change. *Journal of Cleaner Production*, 365, 132847. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132847>
- Ramírez, J., Salazar, M., & Ortega, D. (2023). Predictive demand management and renewable integration. *Energy*, 275, 127474. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127474>
- Riascos, F., & Cepeda, J. (2021). Mathematical modeling of hydroelectric control systems. *Revista Técnica Energía*, 18(1).
- Salto, M., Velásquez, A., & Aguirre, M. (2022). Distributed energy resources and grid resilience. *Revista Técnica Energía*, 18(2).
- Ugalde, J. (2021). Innovation in future smart cities. *Revista Centroamericana de Administración Pública*, 80, 31–44. https://doi.org/10.35485/rcap80_3
- Ulloa, F., Carrizo, D., & García, L. (2021). AMI sensor networks for smart energy systems. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, 29(1), 158–167. <https://doi.org/10.4067/S0718-33052021000100158>
- Villar, S., Rocha, M., & García, A. (2022). Key factors for smart and sustainable cities. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 6(6), 1–20.

Conflicto de intereses:

Los autores declaran que no existe conflicto de interés